

文章编号 1004-924X(2003)02-0157-05

# 二元光学透镜在超光谱成像仪中的应用

于 斌<sup>1</sup>, 曹召良<sup>2</sup>, 禹秉熙<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要:**介绍了二元光学超光谱成像仪的基本原理。提出利用折衍混合透镜代替单一的二元光学透镜来实现色散和成像用于超光谱成像仪,论述了此透镜系统的设计方法,给出了理论设计公式。通过光学设计软件 ZEMAX 对具体实例进行分析和评估,并利用离子束刻蚀法制作了二元光学透镜系统,展示了二元光学透镜在超光谱成像仪中的应用前景。

**关键词:**超光谱成像仪;二元光学透镜;成像光谱仪;折衍混合透镜;离子束刻蚀

**中图分类号:**TP73 **文献标识码:**A

## Application of binary optical lens in hyperspectral imager

YU Bin<sup>1</sup>, CAO Zhao-liang<sup>2</sup>, YU Bing-xi<sup>1</sup>

(1. Department of Space Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China;

2. State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The abundant chromatic aberration of a binary optical lens is used in a novel configuration to create a hyperspectral imager. A diffractive-refractive hybrid singlet is used to replace a binary optical phase lens for an imaging spectrometer. The system is analysed and evaluated with optical software ZEMAX, theoretical formulas are then established, and a binary optical lens is manufactured by ion etching.

**Key words:** hyperspectral imagers; binary optical lenses; imaging spectrometers; diffractive-refractive hybrid singlet; ion etching

## 1 引言

20 世纪 80 年代,遥感技术的重要成就之一是超光谱遥感技术的兴起,它是遥感技术的重要进步和发展。成像光谱仪亦称为超光谱成像仪,它能够在波长相邻、连续采样的窄带光谱波段上获得数十至数百个通道光谱图像,利用这种高光谱分辨率的超多光谱图像数据,可以根据地球表

面众多物体的光谱特征识别他们,还能做到对地面物质的理化、生物性能诊断和成分分析等,因此,它具有广泛的应用前景和其它技术手段无可比拟的优势。在过去的十几年里,欧美等国先后投入了大量人力和物力对成像光谱仪进行研究,已发展了多种色散型、计算层析型和干涉傅里叶变换类型的超光谱成像技术,他们中的一些已在实际系统中得到应用<sup>[1-5]</sup>。美国光量子中心罗姆实验室的 Denise Lyons 在 1995 年 4 月国际光学

收稿日期:2002-05-15;修订日期:2003-01-10.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所青年创新基金资助项目(No. Q01A07)

工程学会上,提出一种新颖结构,利用二元光学透镜独特的色散特性设计出用于可见或红外光谱范围的成像光谱仪<sup>[6]</sup>。此光谱仪光学系统简单,体积小、重量轻、坚固耐用、价格低廉,便于实现小型化和轻量化。提出以折衍混合单透镜代替二元光学透镜来实现色散和成像,并给出了混合单透镜的设计方法和设计结果,以期待对二元光学超光谱成像仪的研制开发及应用有所裨益。

## 2 二元光学超光谱成像仪基本原理

二元光学超光谱成像仪是一种沿光轴方向色散的仪器,它采用了 PAT 公司发明并取得专利的创新技术<sup>[7]</sup>“成像多光谱检测”(Image Multi-spectral sensing 简记为 IMSS)。二元光学超光谱成像仪使用单一的二元光学衍射透镜同时完成成像和色散功能,其基本概念如图 1 所示。在二元光学超光谱成像方法中,二元光学衍射透镜同普通透镜一样会聚入射光线,但它不是根据折射,而是衍射原理。由于衍射作用透镜产生色差的有效焦距同波长成反比<sup>[6]</sup>:

$$f(\lambda) = \frac{\lambda_0}{\lambda} f_0, \quad (1)$$

式中:  $f_0$  是设计波长  $\lambda_0$  的焦距。

将这种波长依赖关系代入衍射一级透镜公式则有:

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}, \quad (2)$$

$$s_i(\lambda) = \frac{f s_o}{s_o - f} = \frac{\lambda_0 f_0 s_o}{\lambda s_o - \lambda_0 f_0}. \quad (3)$$

式中:  $s_i$  和  $s_o$  分别为像距和物距。

衍射一级透镜公式用于衍射透镜时,沿光轴方向的像距依赖于波长  $\lambda$ , 当已知  $s_i$  和  $s_o$  时, 求出波长  $\lambda$ , 根据这一原理可设计出光谱仪。

$$\lambda = \lambda_0 f_0 \left( \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} \right), \quad (4)$$

因此,与棱镜或光栅等元件将光线垂直于光轴方向色散的特性不同,二元光学透镜将入射光线沿光轴方向进行色散(图 1),不同波长的光会聚于光轴上不同的位置,同一目标的不同波段的图像将沿光轴方向分层排列,将面阵探测器置于光轴的不同位置处就可获取不同波段的图像。

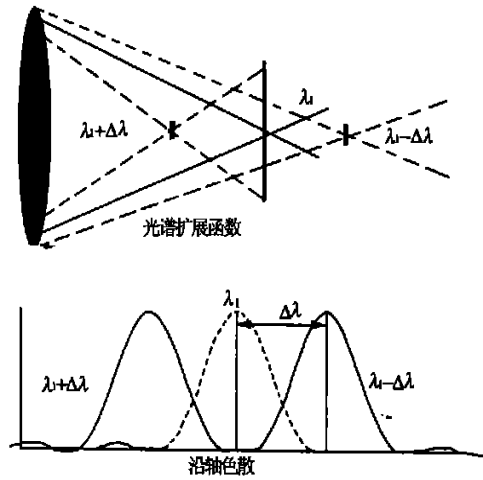


图 1 IMSS 成像光谱仪概念图

Fig. 1 Concept of IMSS imaging spectrometer

## 3 二元光学超光谱成像仪分光系统设计

设计了折衍混合透镜来代替二元光学位相透镜来实现色散和成像,使其轴向色差尽可能大,来满足超光谱成像仪色散条件,获得光谱图像。

### 3.1 折衍透镜的结构形式

平凸基底的弯曲系数  $B = 1$  时的结构形式如图 2 所示,  $r$  为透镜在半径方向上的距离,  $f$  为焦距,此结构具有较小的球差和慧差,选择其结构形式,以使得初始的基底像差最小,减小衍射面消像差的负担,便于进行像差校正。这种结构对应的三级像差系数(光阑密接透镜)由以下各式确定,式中  $S_I \sim S_V$  分别为初级球差、慧差、像散、场曲和畸变系数,  $y$  为近轴边缘光在透镜上的入射高度,  $H$  为拉格朗日不变量,  $C$  为共轭系数,  $K$  为透镜的光焦度,  $n$  为透镜材料的折射率,所有符号意义及正负号规定均遵循维尔福德(Welford)的约定<sup>[8-11]</sup>。

$$S_I = \frac{y^4}{4} \left\{ K_{\text{衍}}^3 \left[ \left( \frac{n}{n-1} \right)^2 + \frac{n+2}{n(n-1)^2} - \frac{4(n+1)}{n(n-1)} + \frac{3n+2}{n} \right] + K_{\text{衍}}^3 (1 + 3C_{\text{衍}}^2) - 32m A_2 \right\}, \quad (5)$$

$$S_{II} = -y^2 H \left\{ \frac{K_{\text{衍}}^2}{2} \left[ \frac{n+1}{n(n-1)} - \frac{2n+1}{n} \right] + K_{\text{衍}}^2 C_{\text{衍}} \right\}. \quad (6)$$

$$S_{III} = H^2(K_{Ref} + K_{Dif}), \quad (7)$$

$$S_{IV} = \frac{H^2 K_{Ref}}{n}, \quad (8)$$

$$S_V = 0. \quad (9)$$

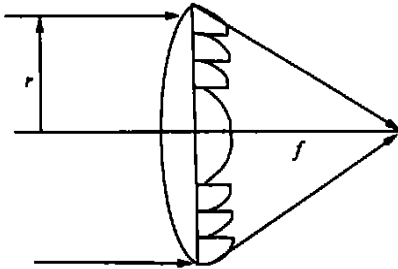


图 2 混合折衍透镜结构

Fig. 2 Construction of hybrid singlet.

### 3.2 确定光焦度分配以满足色散特性——确定 $A_1$ 值

通常设旋转对称二元光学衍射面的相位函数表示形式为:

$$\Phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda_0}(A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + A_4 r^8 + A_5 r^{10} + \dots), \quad (10)$$

式中:  $r$  为透镜在半径方向上的距离,  $A_1 \sim A_5$  为衍射面形系数, 若对于设计波长  $\lambda_0$ , 衍射级次为  $m$  (不特别指明, 一般取  $m = 1$ ) 设计二元器件, 则其傍轴光焦度由(10)式表示的相位函数中的二次项系数  $A_1$  确定:

$$K_{Dif} = -2mA_1, \quad (11)$$

故  $A_1$  的值可由衍射透镜的光焦度确定。

### 3.3 对主设计波长 $\lambda_0$ 消轴上球差——确定 $A_2$

对平凸透镜无穷远成像  $C_{Dif} = -2 \frac{K_{Ref}}{K_{Dif}} - 1$ , 代入公式(5)、(6)使其  $S_I = 0, S_{II} = 0$ , 另因光焦度  $K = K_{Ref} + K_{Dif}$ , 从而确定  $A_2$  的值。

### 3.4 通过计算系统的波像差函数确定衍射面的其它面形系数 $A_3, A_4, A_5 \dots$

衍射面的其他面形系数  $A_3, A_4, A_5 \dots$  为光学设计提供了新的自由度, 在设计中主要用于消除剩余球差。通过光线追迹, 计算出对应不同孔径带的球差, 可求出系统的波像差函数为<sup>[12]</sup>:

$$W = \int_0^y -\Delta L \frac{y}{f^2} dy = -\frac{Y^2}{2f^2} \left[ -\delta \frac{y^2}{Y} + \frac{b_1 y^4}{2Y} + \frac{b_2 y^6}{3Y} + \frac{b_3 y^8}{4Y} + \frac{b_4 y^{10}}{5Y} \dots \right] = B_1 y^2 + B_2 y^4 + B_3 y^6 + \dots, \quad (12)$$

故根据式(10)、(12)可取  $A_3 = -B_3, A_4 = -B_4, A_5 = -B_5, \dots$  作为初始参数。

### 3.5 通过光学设计软件优化初始结构确定最优相位函数形式

确定  $A_1, A_2, A_3, \dots$  后, 则已得到折衍单透镜的初始结构形式, 通过光学设计软件 (Zemax、OSLO 等) 稍加优化即可得到最终各项结构参数。

## 4 设计实例

考虑到实验室现有条件, 二元光学超光谱成像仪结构参数如下: 光谱范围  $0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$ ; 主设计波长  $0.6328 \mu\text{m}$ ; 焦距  $240.16 \text{ mm}$ ; 人瞳直径为  $30 \text{ mm}$ , 密接于第 1 面; 半视场角  $\omega = 1.3^\circ$ ; CCD 摄像机像元尺寸:  $15 \times 15 \mu\text{m}$ , 像元数  $512 \times 512$ 。系统机构参数如表 1 (衍射光学元件相位函数高价项系数略去)。

表 1 图 2 中混合单片透镜参数

Tab. 1 Lens prescription data for hybrid singlet shown in Fig. 2

表面序号	曲率半径 /mm	厚度/mm	玻璃	直径/mm
1	154.9	6	国内 K9	30.03311
2	$\infty$	1	空气	29.84548
3	$\infty$	6	国内 K9	29.79176
4 <sup>D</sup>		232.2399	空气	29.48288

D: 衍射相位透镜的相位系数:  $A_1 = -4.27738 \times 10^{-4}, A_2 = 1.5357 \times 10^{-8}$

图 3 给出了混合单透镜系统焦距随波长变化的曲线, 从图中可看出, 在整个光谱范围内, 轴向焦距变化大约有  $25 \text{ mm}$ , 可以满足超光谱成像光谱仪的需要。图 4 给出了衍射表面的位相轮廓。从位相表达式可算出相位透镜的最小周期大约  $50 \mu\text{m}$ , 在试验室现有条件下, 衍射透镜位相表面经量化可做成四阶或八阶的二元光学器件, 理论计算表明 4 台阶衍射透镜的衍射效率在整个光谱范围内大约为  $56\%$  以上, 可以满足要求。故可以得到结论, 用折衍混合透镜系统代替单一的二元光学相位衍射透镜同样可以满足色散特性, 且能够在试验室现有条件下加工此透镜系统。

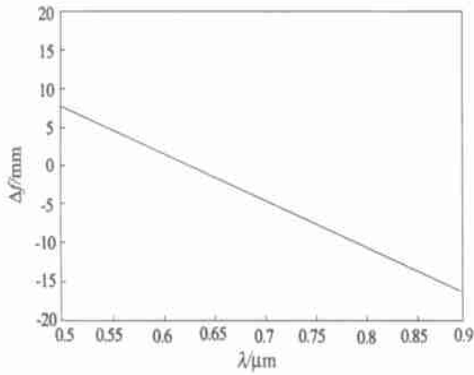


图 3 折衍混合单透镜的焦距随波长的变化

Fig. 3 Chromatic focal shift in hybrid binary optical lens.

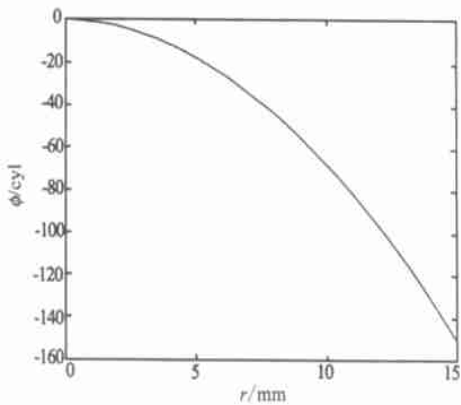


图 4 衍射透镜位相轮廓

Fig. 4 Phase of diffractive surface.

## 5 二元光学透镜的制作

结合本实例,在长春光机所应用光学国家重点实验室利用离子刻蚀制作了 4 台阶二元光学透

镜,透镜基底为 K9 玻璃,每个台阶深度由式(13)给出:

$$d = \frac{\lambda}{4(n-1)}, \quad (13)$$

$\lambda$  为设计波长 632.8 nm,  $n$  为透镜基底折射率 1.514 659, 因此  $d$  大约为 307 nm, 并利用原子力显微镜进行了测试,透镜样品基本符合要求。图 5 为二元光学透镜局部三维轮廓图。

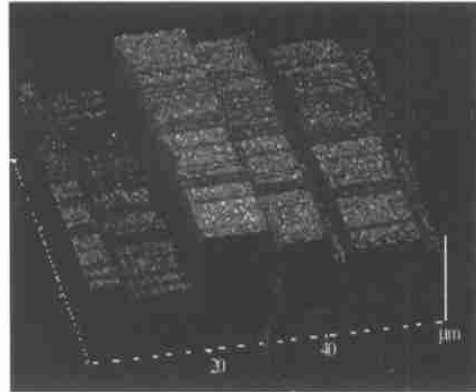


图 5 二元光学透镜局部三维轮廓图

Fig. 5 Three-dimension diagram of local binary optical lens.

## 6 结 论

对二元光学超光谱成像仪的发展现状进行了描述,提出用折衍混合透镜代替单一的二元光学透镜用于超光谱成像仪,解决了衍射透镜加工难的缺点,并在理论上取得了很好的效果。分析表明折衍混合结构在成像光谱方面也将具有广泛的应用前景,这将对二元光学超光谱成像仪的工程研制具有实际意义和价值。

### 参考文献:

- [1] PORTER W M, ENMARK H T. A System overview of the airborne visible/infrared imaging spectrometer(AVIRIS)[J]. *SPIE*, 1987,834:166-174.
- [2] ROCKEY D E. High Resolution imaging spectrometer(HIRIS) a major advance in imaging spectrometry[J]. *SPIE*, 1990,1298:93-104.
- [3] DOZIER J. HIRIS-the high resolution imaging spectrometer[J]. *SPIE*, 1988, 924:23-30.
- [4] BENNETT C L, CARTER M. Imaging Fourier-transform spectrometers[J]. *SPIE*, 1993,1937:191-200.
- [5] 刘良云,相里斌.计算层析成像光谱仪的仿真研究[J]. *光学学报*,2000,20(6):805-809.  
LIU L Y, XIANG L B. Simulation study of computed-tomography imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(6):805-809. (in Chinese)
- [6] LYONS D. Image spectrometry with a diffractive optic[J]. *SPIE*, 1995,2480:123-131.

- [7] HINNRICHS M, MASSIE M. New approach to imaging spectroscopy using diffractive optics[J]. *SPIE*, 1997, 3118: 194-205.
- [8] BURALLI D A, MORRIS G M. Design of a wide diffractive landscape lens[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(18): 3952-3956.
- [9] WELFORD W T. *Aberrations of optical systems* [M]. Bristol: Adam Hilger Press, 1986. 226-234.
- [10] 樊仲维. 光学系统中的二元光学元件[J]. 光学精密工程, 1995, 3(2): 1-10.  
FAN ZH W. Binary optical elements in optical systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, 3(2): 1-10. (in Chinese)
- [11] 张新. 含二元光学元件的光学系统成像特性和设计方法[J]. 光学精密工程, 1994, 2(4): 1-7.  
ZHANG X. Imaging properties the methods of design for optical system with binary ptics elements[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1994, 2(4): 1-7. (in Chinese)
- [12] 潘君骅. 光学非球面的设计加工与检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994, . 147-151.  
PAN J H. *Design manufacture test of optical nospherical surface* [M]. Beijing: Science Press, 1994. 147-151. (in Chinese)

作者简介:于 斌(1976 - ),男,江苏省丰县人,长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,研究领域为光学遥感、二元光学、图像处理。

## 欢迎订阅《中国光学与应用光学文摘》

《中国光学与应用光学文摘》是经国家科委批准,由中科院文献情报中心、中科院光学情报网和中科院长春光学精密机械与物理研究所联合主办的国家级检索刊物,该刊主要收录我国科研人员在国内外期刊和有关会议上发表的科技论文和会议论文,年收录量 5 000 篇左右。《中国光学与应用光学文摘》以文摘形式报道国内光学、光电子学领域的理论研究动态、最新科研成果和相关创新技术,是国内该领域惟一的检索刊物,是了解光电子行业相关科技信息的最新窗口,以报道时差短、检索途径多、信息量充实为特色。

《中国光学与应用光学文摘》为双月刊,大 16 开本,110 页,国内公开发行。邮发代号:12 - 140,定价:15 元/期。为满足不同订户的要求,编辑部亦随时办理破年、破季订阅。

单 位:中科院长春光学精密机械与物理研究所《中国光学与应用光学文摘》编辑部

联系人:杨妹清

地 址:长春市人民大街 140 号

邮 编:130022

电 话:(0431)5261590

账 户:中科院长春光学精密机械与物理研究所

<http://www.ciom.ac.cn>

账 号:01471908091001

E-mail: yanh @ciomp. ac. cn

银 行:中行吉林省分行营业部